文章编号:1000-4939(2024)02-0432-11

动静载作用下充填节理砂岩应力波传播特性研究

殷志强[1,2,3],马凯莉[1,2],吴昊原[1,2],刘贤[1,2],高路路[1,2],王超[1,2]

(1. 安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,232001 淮南;
2. 安徽理工大学矿业工程学院,232001 淮南;
3. 安徽理工大学安徽省煤矿安全采掘装备制造业创新中心,232001 淮南)

摘 要:为研究节理角度和不同围压作用下的充填节理岩石的动态力学特性和应力波传播规律,利用改造后的动静组合加载霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar,SHPB)装置,对充填节理厚度为 8 mm 的砂岩试样进行冲击试验,研究不同围压等级(0、4、6 和 8 MPa)和不同节理倾角(0°、15°、30°、45°)下充填节理试样的动态力学特性和应力波传播的规律,采用应力波斜射理论并进行验证。试验结果表明:①完整砂岩的反射波幅值最小,以 0 MPa 为例,反射波幅值从 0.194×10^{-3} 增长到 0.299×10^{-3},与倾角成正相关,透射波幅值与倾角成负相关,且从 0.169×10^{-3} 减小到 0.053×10^{-3};以 0°为例,反射波幅值与围压呈负相关,且从 0.194×10^{-3} 减小到 0.074×10^{-3},透射波幅值相反从 0.169×10^{-3} 增长到 0.257×10^{-3};②在冲击动载作用下,一定程度围压可以起到限制变形,抑制胶结面分离,提高承载能力;节理倾角越大的充填节理产生的变形越大,承载状态越差;③倾角试件随着围压增大反射能力降低,透射能力提高,0°倾角试件的反射系数从 0.603 减小到 0.147,透射系数从 0.569 均匀增加到 0.789,围压试件随着倾角的增大反射能力增大,透射能力降低与理论分析规律一致;④节理倾角与试样吸收能密度呈负相关,围压与试样吸收能密度呈正相关,与围压作用下的透反射规律一致。

关键词:充填节理;围压等级;SHPB 冲击;动态力学特性;应力波斜射理论

中图分类号:TD313 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.017

Study on stress wave propagation characteristics of filled jointed sandstone under dynamic and static loading

YIN Zhiqiang[1,2,3],MA Kaili[1,2],WU Haoyuan[1,2],LIU Xian[1,2],GAO Lulu[1,2],WANG Chao[1,2]

(1. Key Laboratory of Safe and Effective Coal Mining of Ministry of Education,Anhui University of Science and Technology,232001 Huainan,China;2. School of Mining Engineering,Anhui University of Science and Technology,232001 Huainan,China;3. Coal Mine Safety Mining Equipment Innovation Center of Anhui Province,Anhui University of Science and Technology,232001 Huainan,China)

Abstract:In order to study the dynamic mechanical characteristics and stress wave propagation law of filled joint rocks under different confinement angles and different confining pressures,the impact test was

收稿日期:2023-05-04 **修回日期**:2023-08-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52274070)
通信作者:殷志强,教授。E-mail:zhqyin@aust.edu.cn
引用格式:殷志强,马凯莉,吴昊原,等. 动静载作用下充填节理砂岩应力波传播特性研究[J]. 应用力学学报,2024,41(2):432-442.
YIN Zhiqiang,MA Kaili,WU Haoyuan,et al. Study on stress wave propagation characteristics of filled jointed sandstone under dynamic and static loading[J]. Chinese journal of applied mechanics,2024,41(2):432-442.

carried out on sandstone specimens with a filling joint thickness of 8 mm by using the modified dynamic and static combination loading (split hopkinson pressure bar, SHPB) device. The dynamic mechanical characteristics and stress wave propagation laws of filled joints under different confining pressure grades (0,4,6 and 8 MPa) and different joint inclination angles (0°,15°,30° and 45°) were studied, and the stress wave oblique emission theory was used and verified. The experimental results show that ①The reflected amplitude of intact sandstone is the smallest. Taking 0 MPa as an example, the reflected amplitude increases from 0.194×10^{-3} to 0.299×10^{-3}, which is positively correlated with the inclination, and the transmission amplitude is negatively correlated with the inclination angle from 0.169×10^{-3} to 0.053×10^{-3}. Taking 0° as an example, the reflected amplitude is negatively correlated with the confining voltage, which decreases from 0.194×10^{-3} to 0.074×10^{-3} and the transmitted amplitude increases from 0.169×10^{-3} to 0.257×10^{-3}. ②Under the action of impact dynamic load, a certain degree of confining pressure can limit deformation, inhibit cementation surface separation, and improve bearing capacity. The larger the inclination angle of the joint, the greater the deformation of the filling joint, and the worse the bearing state. ③With the increase of confining pressure, the reflectivity decreases and the transmission capacity increases. The reflection coefficient of the 0° inclination specimen decreases from 0.603 to 0.147, and the transmission coefficient increases uniformly from 0.569 to 0.789. With the increase of inclination angle, the reflection capacity of the confining pressure specimen increases, while the transmission capacity decreases, which is consistent with the theoretical analysis law. ④The joint inclination angle is negatively correlated with the absorption energy density of the sample, but the confining pressure is positively correlated with the absorption energy density of the sample, which is consistent with the transmission reflection law under the action of confining pressure.

Key words: filling joint; confining pressure level; SHPB shock; dynamic mechanical property; stress wave oblique emission theory

围岩体经过漫长构造演化,岩体内部发育不完全,存在着大量纵横交错的结构面,弱填充节理作为结构面的一种,广泛存在于实际工程中,由于其强度远小于岩体的抗压强度,胶结作用较弱,受力复杂。在隧道、矿山巷道以及深部开采工程中,由于自重应力、爆破、机械开挖扰动的影响使得围岩体受力复杂,深部围岩体表现为“三高一扰动”特点,实际工程中会产生的各种形式的扰动应力波将会严重影响到围岩的稳定性。因此开展动、静载作用下的充填节理砂岩的动态力学特性和应力波传播特性研究,分析围岩体的稳定性并采取有效措施具有重要意义,对含软弱结构面围岩体煤矿开采实际工程中提供参考意义。

针对节理岩体的动态力学特性和应力波传播规律,国内外学者通过理论分析和室内试验的方法进行大量分析研究。CHEN 等[1]以表征岩体中节理接触面积比的节理匹配系数(joint matching coefficient, JMC)为关键参数,建立 CIM-JMC 模型,得到并计算节理处的反射波和透射波的能量系数。刘传正等[2]研究应力波在夹层当中的多次折反射能量的变化,通过理论分析发现内外侧的波阻抗的差异影响着能量累计系数。FENG 等[3]用数值模拟来分析不连续性岩石中应力波的传播方式,发现倾角以及两侧岩体的密度等物理参数对应力波的传播有一定的影响。LI 等[4-5]、ZHU 等[6]和 FAN 等[7]采用薄膜模型、黏弹性模型以及特征线等理论模型的基础上。王建国等[8]利用水泥砂浆模拟倾角节理岩石进行霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)冲击试验,发现在相同冲击速度下,反射能量比值随着节理倾角的增大先增大后减小,透射能量比先减小后增大。WANG 等[9]采用光弹性仪和霍普金森杆对不同接触面积和厚度的聚碳酸酯板进行试验,发现接头处的厚度对应力波的传播起主要影响作用。XIAO 等[10]和刘少虹等[11]研究了动静荷载下节理试样和煤岩结构的应力波传播规律,发现静载对应力波传播有着明显的影响。SU 等[12]研究不同角度下砂岩的动态力学参数发现 45°角反射系数达到最大,吸收能密度最小化。YU 等[13]对不同厚度、角度的充填节理试样进行冲击发现应力波在节理传播与冲击速度有关。杨仁树等[14]通过相似配比试样研

究充填材料对节理岩石动态力学影响,发现低强度充填材料会使动态抗压强度指数衰减。李夕兵等[15]针对摩擦滑移的弱结构面,建立其边界条件,分析了应力波在斜入射这种节理岩体时的透射、反射以及能量损耗的关系。陈超和金解放等[16-17]以不同的轴压水平对试件进行冲击,分析试件的动态强度和变形特征,发现轴压的大小对试样的动态力学参数有一定的影响。

研究主要集中在静动载强度,填充物强度厚度、节理角度等单一因素分析岩石的动态力学特性、破坏特征以及能量耗散等。节理的存在对围岩体的动态力学特性和应力波传播有重要的影响,在实际深部开采过程中,围岩体受力较为复杂,不仅受到地应力静载作用还受到动载扰动影响,应力波在传播过程中会产生衰减现象。因此研究初始应力波在填充节理围岩体的应力波传播规律对工程实际具有重大意义。本研究采用改进的 SHPB 装置,将填充材料水泥砂浆和红砂岩试样组成填充厚度 8 mm 不同节理角度的试样,进行不同静载条件下(0、4、6、8 MPa 共 4 种静载条件)下的动态冲击试验,分析静载条件和节理角度对充填节理试样的动态力学特性及应力波传播规律的影响,并通过应力波斜射理论进行验证,对研究爆破等扰动的围岩支护具有重要的意义。

1 试样制作与试验

1.1 试样制作

根据充填节理特性,两侧岩石要与充填物质有明显区分,本研究中两侧岩石选择力学性质较好的红砂岩,充填材料比例为水泥:水:砂 = 1:0.5:2[18],制成水泥砂浆,相关物理力学参数见表1,将红砂岩按照0°、15°、30°、45°进行切割,水泥砂浆填充,填充厚度为 8 mm,制成 Φ50 mm × 50 mm 的填充节理试样,如图1所示。打磨试样,保证其上下两端面平整度能够满足 ±0.02 mm 内,轴线偏差以及不平行度等满足 ISRM 的要求。

由表1可知,充填材料的最大应力平均值为 35.62 MPa,弹性模量平均值为 33.39 GPa,完整砂岩的弹性模量平均值为 74.37 GPa,最大应力平均值为 97.59 MPa,两种材料物理参数差异较大,符合两侧岩层强度较大、中间夹层强度较小的软弱夹层,可以作为制作动静组合下不同倾角节理试件的理想材料。

表1 试样力学参数

Tab.1 Specimen mechanical parameters

试样	组数	弹模/GPa	平均值/GPa	最大应力/MPa	平均值/MPa
填充材料	1	34.91	33.39	35.19	35.62
	2	32.52		37.87	
	3	32.76		33.81	
完整砂岩	1	75.53	74.37	98.53	97.59
	2	72.23		95.77	
	3	75.36		98.47	



图1 充填节理试样图

Fig.1 Dagram of filling joint specimen

1.2 试验装置

基于 SHPB 装置的岩石动静组合加载试验示意图如图2所示。杆件系统均采用高强度合金,弹性模量 E 为 210 GPa,密度 ρ 为 7 850 kg/m^3,纵波波速为 4 967 m/s,入射杆透射杆直径为 50 mm,长度分别为 1 000 mm 和 1 500 mm,采用纺锤形冲头消除 PC 振荡产生稳定半正弦波,长度为 300 mm。充填节理试样放置在入射杆与透射杆之间,纺锤形子弹冲头在高压气体推动下撞击入射杆从而形成入射波,当入射波传递到试样右端时,一部分入射波反射回来形成反射波,另一部分穿过试样形成透射波,通过粘贴在入射杆和透射杆上的应变片接收冲击过程中产生的脉冲信号,接入信号采集系统得到波形图。

1.3 试验方法

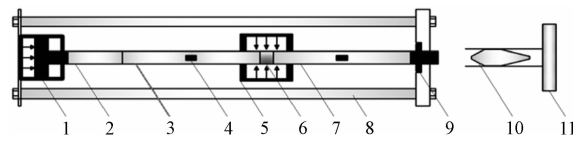
试验前调试校正试验仪器,保证入射杆、透射杆截面对齐,处于同一中轴线,进行空杆测试,试件两端均匀涂抹适量凡士林并于两杆之间夹紧,通过围压装置中的手动液压泵调节围压到 0、4、6、8 MPa 4 种静载情况。静载加载稳定后,标记纺锤形子弹的发射腔内位置,设置冲击气压为 0.2 MPa,高压气体冲击子弹经过测速仪撞击杆件并通过应变片采集信号,为保证试验准确性,每个试样重复3次,选择合适数据进行分析。利用"三波法"对采集的入射波信号 $\varepsilon_i(t)$、反射波信号 $\varepsilon_r(t)$ 和透射波信号 $\varepsilon_t(t)$ 进行信号数据处理,得到

$$\sigma(t) = \frac{EA_0}{2A_s}[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L_s}[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \tag{2}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L_s}\int_0^t[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)]\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中:$\sigma(t)$ 为应力;$\dot{\varepsilon}(t)$ 为应变率;$\varepsilon(t)$ 为应变;A_0 为压杆横截面积;A_s 为试件初始截面积;E 为入射杆和透射杆弹性模量;C_0 为应力波钢管传播波速度;L_s 为试件初始长度;$\varepsilon_i(t)$,$\varepsilon_r(t)$、$\varepsilon_t(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波信号。



1-轴压加载装置;2-吸收杆;3-透射杆;4-电阻应变片;5-围压装置;6-节理试件;7-入射杆;8-支架;9-轴压端帽;10-异型冲头;11-高压气室

图 2　基于 SHPB 装置的岩石动静组合加载试验示意图

Fig. 2　Schematic diagram of rock dynamic and static combined loading test based on SHPB device

2　结果与分析

2.1　试验波形图

图 3 为 0 MPa、0°下的节理试件应力平衡曲线。从图 3 可以看出,充填节理试样基本满足应力均匀性要求,不同围压等级和倾角下的试样波形图如图 4 所示,透反射幅值规律如图 5 所示。

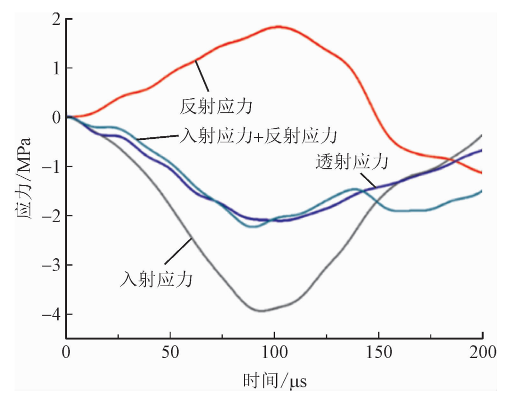


图 3　典型充填节理试件应力平衡曲线图

Fig. 3　Stress balance curve of typical filled joint specimen

(a) 0 MPa围压节理倾角变化波形图

(b) 4 MPa围压节理倾角变化波形图

(c) 6 MPa围压节理倾角变化波形图

(d) 8 MPa围压节理倾角变化波形图

图 4　不同节理倾角的应力波传播曲线

Fig. 4　Stress wave propagation curves for different nodal inclination angles

应力波波形应变 ε 和电压的关系满足

$$U = K\varepsilon I$$

式中:U 为电压;K、I 分别为标定系数、电流,且 K、I 均为定值。

由图 4 可见,由于冲击速度一定,入射波的幅值均在 0.32×10^{-3}左右,以 0 MPa 围压为例,应力波在不同倾角充填节理的透反射规律如图 4(a)所示,完整岩石的反射波幅值最小,为 0.18×10^{-3},0°充填节理反射波幅值略大于完整岩石为 0.19×10^{-3},反射波幅值和节理倾角正相关,45°节理倾角的反射波幅值最大,为 0.29×10^{-3}。而透射波相反,完整岩石的透射波幅值最大,为 0.21×10^{-3},0°充填节理透射波幅值为 0.17×10^{-3},反射波幅值和节理倾角负相关,45°节理倾角透射波幅值最小为 0.15×10^{-3}。

围压为 4、6、8 MPa 时,透反射规律与 0 MPa 围压是相似的。入射波幅值均在 0.32×10^{-3}左右,完整砂岩的反射波幅值最小,随着倾角增大,反射波幅值出现增强现象;透射波幅值则相反,完整砂岩透射波幅值最大,随着倾角增加,透射波幅值出现衰减现象,这是因为完整砂岩内部原生裂隙较少,致密性较强,透射能力较强,而节理试件内部存在胶结面,胶结面两端波阻抗不同,会发生透反射现象,导致透射能力减弱。由于轴向静载的作用导致冲击过程中充填节理砂岩试样会产生一定的横向变形,导致在图 4 入射波波尾与反射波之间增加一段过渡段,入射波上升到初始零点时,原有的轴向静应变会进一步释放,产生正的拉伸波。

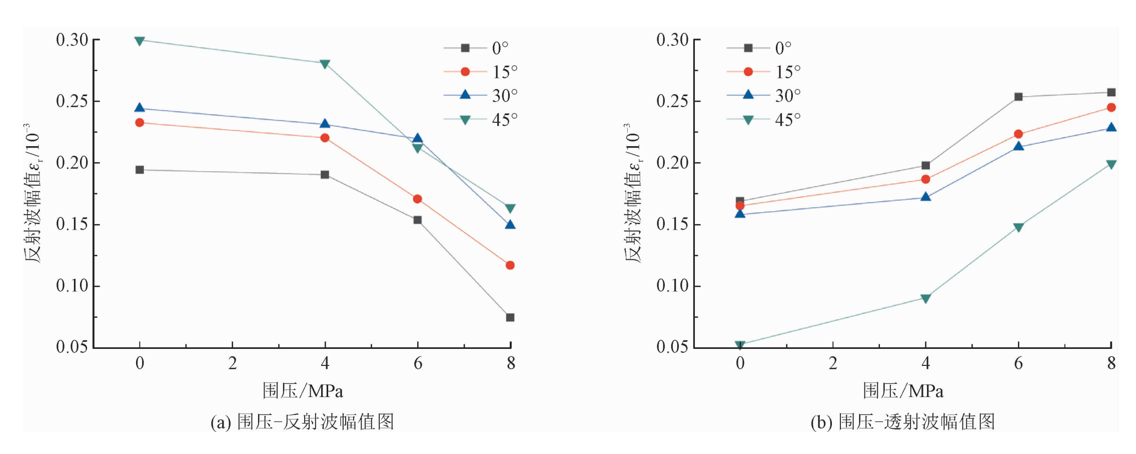


图 5 不同围压下的透反射波幅值图

Fig. 5 Amplitude of transmission and reflection under different confining pressures

由图 5 可以看出,不同节理倾角下的反射波幅值、透射波幅值的整体规律相似,透射波幅值随围压的增加呈正相关,反射波幅值则相反。以 0°节理为例随着围压从 0 ~ 8 MPa 增加,反射波幅值分别为 0.194×10^{-3}、0.19×10^{-3}、0.153×10^{-3}和 0.073×10^{-3},呈现衰减趋势,透射波幅值分别为 0.169×10^{-3}、0.198×10^{-3}、0.253×10^{-3}和 0.257×10^{-3},呈现逐渐增加的趋势,说明静载增强了应力波的透射。

由于静载的作用,使得试件内部的原生裂隙以及胶结面紧密贴合,试件的致密性增加,应力波透射增强,其中节理倾角为 45°时,透反射波的幅值受静载影响幅度更大,这是因为 45°填充较于 0°、15°、30°以及完整试样内部的裂隙相对较多,受到相同静载下裂隙与胶结面贴合不太完全导致低静载下透射波幅值较低,静载逐渐增加贴合逐渐紧密,使得试样的致密性能更好,高静载下增加幅度更明显。

2.2 应力-应变曲线

根据图 4 的应力波传播曲线,利用"三波法"计算得到应力-应变曲线如图 6 所示,最大应力、应变图如图 7 所示。

由图 6、图 7 可知,试件在动态加载前首先受到静载作用使得试样内部的原生裂隙闭合,导致曲线未出现压密下凹段,将曲线划分成 3 个阶段:*OA* 段近似线弹性加载,倾角越大弹性模量增长越缓慢;*AB* 段开始非线性加载,弹性模量的增长减缓,试样内部裂隙萌生、发育,曲线随倾角的减小快速达到应力峰值;*BC* 段曲线为弹性卸载,试件内部开始释放储存的能量。

围压为 4、6、8 MPa 时,应力-应变曲线的规律与 0 MPa 围压整体相似。以 0 MPa 下不同节理倾角的应力-应变分析可知,完整试件的最大应力为

2.43 MPa,最大应变为 0.14×10^{-3}。除了完整试件,节理倾角从 0°增加到 45°,最大应力分别为 2.2、1.93、1.73、0.59 MPa,逐渐降低,最大应变分别为 0.15×10^{-3}、0.2×10^{-3}、0.26×10^{-3} 和 0.33×10^{-3},逐渐增加。说明在冲击荷载下,节理倾角越大的充填节理产生的变形越大,承载状态越差。完整试件以及 0°～30°节理倾角的应力-应变曲线均出现"应变回弹"现象,随着节理倾角的增加现象减弱,而 45°节理倾角基本已经没有"应变回弹"现象。

(a) 0 MPa围压节理倾角变化应力-应变曲线

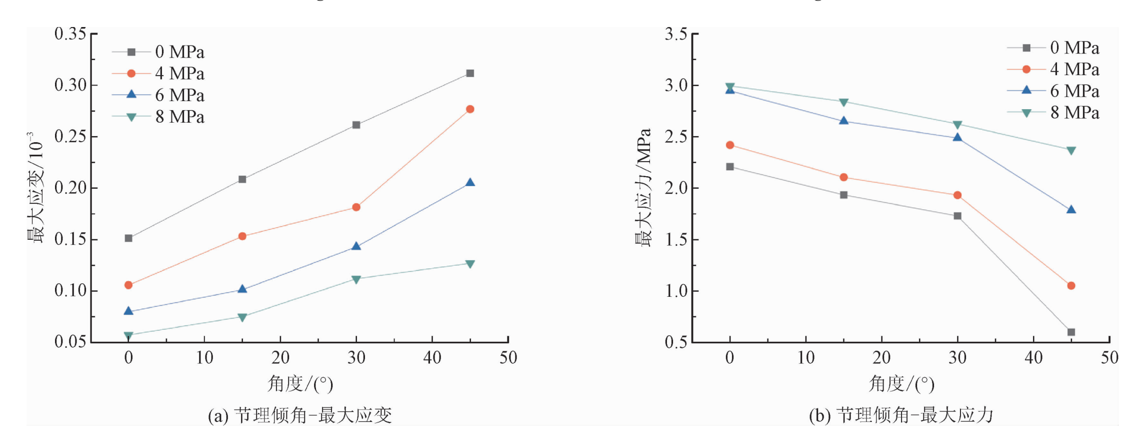
(b) 4 MPa围压节理倾角变化应力-应变曲线

(c) 6 MPa围压节理倾角变化应力-应变曲线

(d) 8 MPa围压节理倾角变化应力-应变曲线

图 6　不同倾角的应力-应变曲线

Fig. 6　Stress-strain curves for different inclination angles



(a) 节理倾角-最大应变

(b) 节理倾角-最大应力

图 7　不同倾角下力学参数曲线

Fig. 7　Curves of mechanical parameters at different inclination angles

结合图 6 将不同围压的应力应变曲线划分 3 阶段:*OA* 段为线弹性加载阶段,围压与弹性模量正相关;*AB* 段曲线为非线性加载,节理试件内部裂隙萌生,弹性模量增长缓慢;*BC* 段曲线为弹性卸载,应变回弹阶段,将储存的能量释放,高围压限制裂纹扩展。以 0°倾角为例当围压从 0 MPa 增加到 8 MPa

时，最大应力分别为2.2、2.41、2.95、2.99 MPa，呈现逐渐增加的趋势，最大应变分别为 0.151×10^{-3}、0.106×10^{-3}、0.08×10^{-3} 和 0.057×10^{-3}，与围压呈负相关。除了0 MPa、45°倾角外，其余试验均出现“应变回弹”现象，且随着围压的增加，“应变回弹”现象逐渐明显。说明在冲击动载作用下，一定程度围压可以起到限制变形，抑制胶结面分离，提高承载能力。

2.3　能量演化特征

基于SHPB一维弹性应力波及均匀性假设，对处于围压条件、倾角条件的试件分析岩体的能量耗散特性，可以较为清楚的了解岩体裂隙贯通过程和破坏。入射波、反射波以及透射波携带的能量分别为入射能 W_I、反射能 W_R 和透射能 W_T，吸收能为 W_S 近似等于破碎能 W_{FD}。根据能量守恒定律以及应变信号得到入射能 W_I、反射能 W_R 和透射能 W_T。由于室内试验误差，便于区分试验数据，对吸收能密度 W，透反射系数分别定义为吸收能量与试样体积比值和透反射最大应变与入射最大应变的比值。

$$W_I(t)=\frac{A_0}{\rho_0C_0}\int_0^t\sigma_i^2(t)\mathrm{d}t=A_0C_0E\int_0^t\varepsilon_i^2(t)\mathrm{d}t \tag{4}$$

$$W_R(t)=\frac{A_0}{\rho_0C_0}\int_0^t\sigma_r^2(t)\mathrm{d}t=A_0C_0E\int_0^t\varepsilon_r^2(t)\mathrm{d}t \tag{5}$$

$$W_T(t)=\frac{A_0}{\rho_0C_0}\int_0^t\sigma_t^2(t)\mathrm{d}t=A_0C_0E\int_0^t\varepsilon_t^2(t)\mathrm{d}t \tag{6}$$

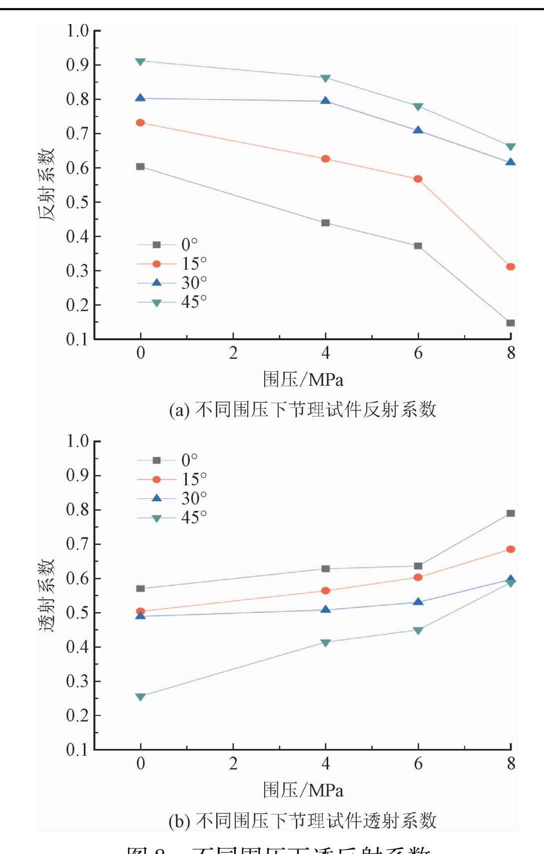
$$W_S=W_{FD}=W_I(t)-W_R(t)-W_T(t) \tag{7}$$

$$R_C=\frac{\max|\varepsilon_r(t)|}{\max|\varepsilon_i(t)|} \tag{8}$$

$$T_C=\frac{\max|\varepsilon_t(t)|}{\max|\varepsilon_i(t)|} \tag{9}$$

式中：$\sigma_i(t)$，$\sigma_r(t)$，$\sigma_t(t)$ 分别为入射应力、反射应力和透射应力；$\varepsilon_i(t)$，$\varepsilon_r(t)$，$\varepsilon_t(t)$ 分别为入射应变、反射应变和透射应变；ρ_0 为杆件密度；A_0 为杆件横截面积；C_0 为弹性波波速；W_I 为入射能；W_R 为反射能；W_T 为透射能；W_S 为吸收能。

由图8可知，不同节理倾角下，随着围压的增大反射系数呈现逐渐减少趋势，而透射系数呈现逐渐增加的趋势。以节理倾角为0°为例，围压等级从0 MPa升高至8 MPa时，反射系数依次为0.603、0.439、0.372和0.147，呈现逐渐降低的趋势，透射系数依次为0.569、0.627、0.635和0.789，呈现出逐渐增加的趋势。15°、30°和45°节理倾角的透反射系数，趋势同节理倾角为0°一致。



(a) 不同围压下节理试件反射系数

(b) 不同围压下节理试件透射系数

图8　不同围压下透反射系数

Fig. 8　Transflection coefficient under different confining pressures

由图9可知，在相同等级的围压条件下，随着节理倾角的增大，反射系数呈现逐渐增加趋势，而透射系数呈现逐渐减小的趋势。以围压等级为0 MPa为例，节理倾角从0°升高至45°的反射系数依次为0.603、0.731、0.802和0.911，逐渐增加，透射系数依次为0.569、0.503、0.488和0.255呈现出逐渐减小的趋势。4、6、8 MPa围压等级下，趋势同0 MPa等级规律相同。

由图10(a)可知，不同围压等级下，随着节理倾角的增大，吸收能密度呈现逐渐减少的趋势。以0 MPa为例，节理倾角从0°升高到45°的吸收能密度依次为70.74、55.41、53.69、和38.06 J/m^3，逐渐降低。4、6、8 MPa围压等级下，趋势同0 MPa等级规律相似。

由图10(b)可知在不同节理倾角下，随着围压等级的增大吸收能密度呈现逐渐增加的趋势。以0°为例，围压等级从0 MPa升高至8 MPa下的吸收能密度为70.74、122.86、133.84、152.81 J/m^{3}逐渐增大，高围压能够增加试样吸收能密度，这与高围压限制裂纹生长试件的内部吸收能量较高的观点一致。15°、30°和45°节理倾角试件吸收能密度趋势同0°规律相同。

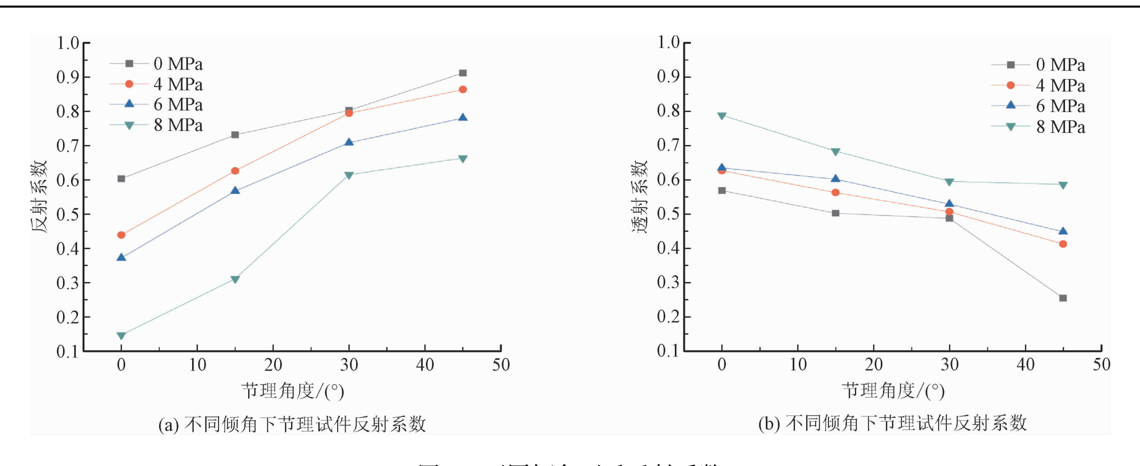


图 9　不同倾角下透反射系数

Fig. 9　Transflection coefficient at different inclination angles

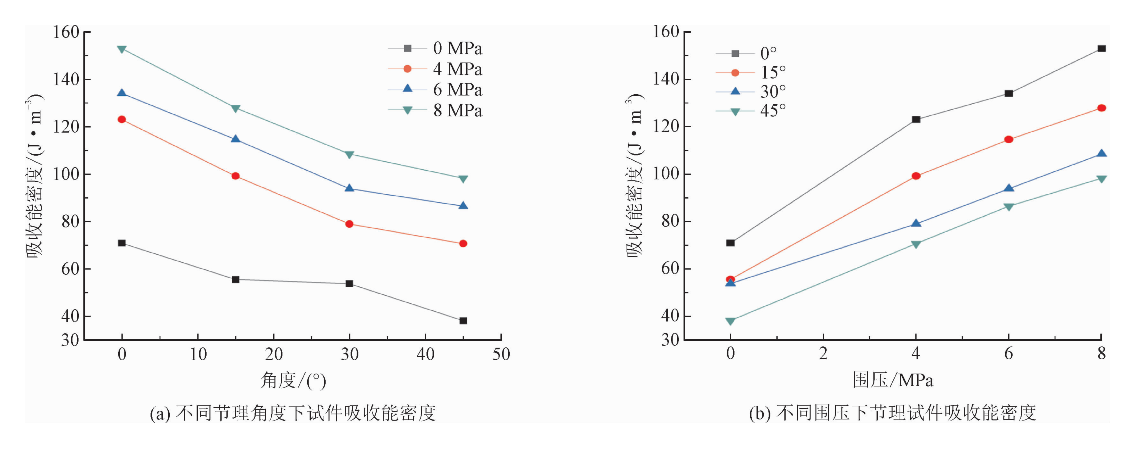


图 10　吸收能密度图

Fig. 10　Absorption energy density diagram

3　讨　论

地下岩体经过漫长演化,内部存在大量结构弱面,结构弱面存在的随机性对应力波传播规律影响较大,通过对斜入填充节理进行分析研究应力波在充填节理下的应力传播规律对分析含软弱夹层岩石具有一定的现实意义。应力波斜入到填充节理时会产生 4 种波,由于横波引起的剪应力较小所以纵波入射产生的横波忽略[19-20]。应力波斜入填充节理界面时发生多次的透反射,应力波传播示意图如图 11 所示。

当应力波在填充节理界面成以角度 θ 入射形成第一次透反射

$$\sigma_R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\sigma_I \frac{\cos\theta}{\cos\beta_R} \tag{10}$$

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\sigma_I \frac{\cos\theta}{\cos\alpha_T} \tag{11}$$

式中:σ_I、σ_R、σ_T 分别为入射应力、反射应力、透射应力;ρ_1、ρ_2 分别为红砂岩、填充材料密度;c_1、c_2 别为应力波在对应介质中传播的速度;θ、β_R、α_T 分为应力波入射角、反射角、透射角。

由于应力波在节理岩层传播过程中会产生衰减现象,σ_T在填充节理进行传播时将转化为$\sigma_T + \Delta\sigma_{T1}$($\Delta\sigma_{T1}$ 为负值),为了公式推导简洁,令 $\Delta\sigma_{T1} = \Delta\sigma_1$。

$$\sigma_{R1} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}(\Delta\sigma_1 + \sigma_T)\frac{\cos\alpha_T}{\cos\beta_{R1}} \tag{12}$$

$$\sigma_{T1} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}(\Delta\sigma_1 + \sigma_T)\frac{\cos\alpha_T}{\cos\alpha_{T1}} \tag{13}$$

应力波传递中衰减值的大小可以通过应力波通过填充节理的有效厚度进行定量分析。应力波通过一般岩石的衰减规律满足 $\sigma \propto 1/r_r^w$,岩体中柱面波 $1 \leqslant w \leqslant 2$。

$$\Delta\sigma_i = \left(1 - \frac{k}{r_r^w}\right)\sigma_R(i-1),\ i = 1,2,3,\cdots,n \tag{14}$$

$$r_{\mathrm{r}}=\frac{r}{\cos\theta}\tag{15}$$

假设应力波在硬岩传播的过程中不进行衰减，即 $i=1$ 满足 snell 定律

$$\frac{\sin\theta}{c_1}=\frac{\sin\beta_{\mathrm{R}}}{c_1}=\frac{\sin\alpha_{\mathrm{T}}}{c_2}\tag{16}$$

$$\frac{\sin\beta_{\mathrm{R}(i-1)}}{c_2}=\frac{\sin\beta_{\mathrm{R}i}}{c_2}=\frac{\sin\alpha_{\mathrm{T}i}}{c_1}\tag{17}$$

$$\sin\alpha_{\mathrm{T}}=\frac{c_2}{c_1}\sin\theta\tag{18}$$

把式(14)~(18)代入式(12)、(13)联立可得

$$\sigma_{\mathrm{R1}}=\frac{k}{r_{\mathrm{r}}^{w}}\times\frac{\rho_1c_1-\rho_2c_2}{\rho_2c_2+\rho_1c_1}\sigma_{\mathrm{T}}\tag{19}$$

$$\sigma_{\mathrm{T1}}=\frac{k}{r_{\mathrm{r}}^{w}}\times\frac{2\rho_1c_1}{\rho_2c_2+\rho_1c_1}\sigma_{\mathrm{T}}\frac{\cos\alpha_{\mathrm{T}}}{\cos\theta}\tag{20}$$

其中入射应力为

$$\sigma_{\mathrm{I}}=\frac{1}{2}\rho_0cv\tag{21}$$

式中：ρ_0 为 SHPB 密度；c 为应力波传播速度；v 为冲击子弹的速度。

$$T=\frac{\sigma_{\mathrm{T1}}}{\sigma_{\mathrm{I}}}\tag{22}$$

式(20)和(21)代入式(22)得

$$T=\frac{k\rho_1c_1\cos^2\alpha_{\mathrm{T}}}{r_{\mathrm{r}}^{w}\rho_2c_2\cos^2\theta}\tag{23}$$

式(15)~(23)中：$\rho_1=2\,600\ \mathrm{kg/m^3}$；$c_1=3\,462\ \mathrm{m/s}$；$\rho_2=1\,912\ \mathrm{kg/m^3}$；$c_2=2\,381\ \mathrm{m/s}$；$r=8\ \mathrm{mm}$；$\rho_0=7\,850\ \mathrm{kg/m^3}$；$c=4\,967\ \mathrm{m/s}$；$v=3.5\ \mathrm{m/s}$。

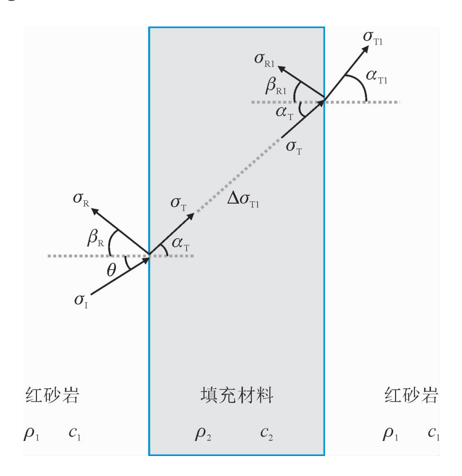


图 11 应力波斜入充填节理示意图[16]

Fig. 11 Schematic diagram of stress wave oblique filling joint[16]

在 SHPB 冲击试验中试样两侧为红砂岩，中间填充材料为强度较弱的水泥砂浆，应力波在传递过程中经过红砂岩与充填节理界面发生透反射，并假设应力波在硬岩传播过程中不经历衰减。通过理论进行验证如图 12 所示。

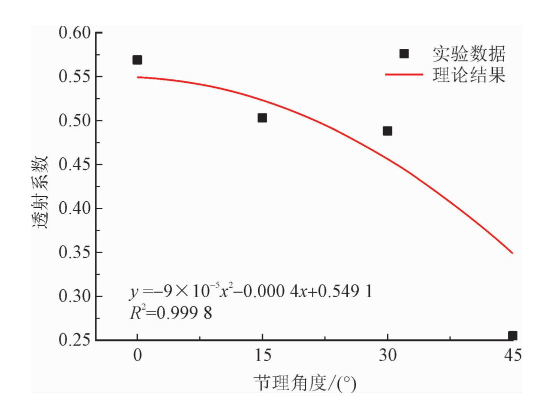


图 12 透射系数验证图

Fig. 12 Transmission coefficient verification diagram

表 2 0 MPa 下节理试样试验结果与理论结果对比

Tab. 2 Comparison of test results and theoretical results of jointed specimens under 0 MPa

透射系数	0°	15°	30°	45°
理论值	0.549	0.525	0.455	0.349
试验值	0.569	0.503	0.488	0.255
误差/%	1.78	2.14	3.50	16.3

通过对 0 MPa 下不同节理倾角试样进行验证，计算透射系数理论值，发现除 45°以外，其余节理角度的理论值与试验值误差在 5% 以内，理论推导与试验结果一定程度上可以相互验证。

4 结 论

利用霍普金森杆进行室内试验，对不同围压等级和倾角下的充填节理试件进行动态力学特性、能量耗散以及透反射系数分析，得出以下结论。

1）分析围压和倾角条件下的动态力学特性。以围压 0 MPa 为例，随着倾角 0°到 45°，最大应力分别从 2.2 MPa 逐渐减小到 0.59 MPa，对应的最大应变呈现逐渐增加的趋势，其余围压条件规律相似。以倾角 0°为例，随着围压从 0 MPa 增加到 8 MPa，最大应力分别从 2.2 MPa 逐渐增加到 2.99 MPa，最大应变从 0.151×10^{-3} 逐渐降低到 0.057×10^{-3}，其余倾角均有相同的变化规律。

2）获得围压和倾角条件下的透反射系数。围压 0 MPa，随着倾角增大，反射系数从 0.603 增加到 0.911，透射系数从 0.569 降低到 0.255，倾角 0°，随

着围压等级增大,反射系数从 0.603 降低到 0.147,透射系数从 0.569 增加到 0.789,其他条件下透反射系数规律与典型代表规律一致。

3)利用吸收能密度分析围压和倾角条件下的能量情况。围压 0 MPa,随着倾角的增大,吸收能密度分别为 70.74、55.41、53.69、38.06 J/m^3 逐渐减少,其余围压条件规律相似。倾角 0°,随着围压等级增大,吸收能密度分别为 70.74、122.86、133.84、152.81 J/m^3 逐渐增加,其余倾角条件下的吸收能密度也呈现逐渐增加趋势。

4)通过应力波斜入充填节理理论进行分析验证,得到应力波斜入节理下的透射系数公式,对不同角度斜入射透射系数进行比较,整体趋势相同。随着角度的增大透射理论值分别为 0.549、0.524、0.455、0.350 理论推导结果与试验结果误差除 45°以外误差均在 5% 以内。

参考文献:

[1] CHEN X,CAI M F,LI J C,et al. Theoretical analysis of JMC effect on stress wave transmission and reflection[J]. International journal of minerals,metallurgy,and materials,2018,25(11):1237-1245.

[2] 刘传正,张建经,崔鹏. 岩体夹层应力波能量演化及应力响应特征分析[J]. 岩土力学,2018,39(6):2267-2277.
LIU Chuanzheng,ZHANG Jianjing,CUI Peng. Energy evolution and stress response during stress wave prorogation in the intercalation[J]. Rock and soil mechanics,2018,39(6):2267-2277(in Chinese).

[3] FENG X J,ZHANG Q M,ALI M. Explosion-induced stress wave propagation in interacting fault system:numerical modeling and implications for Chaoyang coal mine[J]. Shock and vibration,2019,2019:5856080.

[4] LI J C,WU W,LI H B,et al. A thin-layer interface model for wave propagation through filled rock joints[J]. Journal of applied geophysics,2013,91:31-38.

[5] LI J C,LIU T T,LI H B,et al. Shear wave propagation across filled joints with the effect of interfacial shear strength[J]. Rock mechanics and rock engineering,2015,48(4):1547-1557.

[6] ZHU J B,ZHAO X B,WU W,et al. Wave propagation across rock joints filled with viscoelastic medium using modified recursive method[J]. Journal of applied geophysics,2012,86:82-87.

[7] FAN L F,WONG L N Y. Stress wave transmission across a filled joint with different loading/unloading behavior[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2013,60:227-234.

[8] 王建国,梁书锋,高全臣,等. 节理倾角对类岩石冲击能量传递影响的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(5):1237-1243.
WANG Jianguo,LIANG Shufeng,GAO Quanchen,et al. Experimental study of jointed angles impact on energy transfer characteristics of simulated rock material[J]. Journal of Central South University(science and technology),2018,49(5):1237-1243(in Chinese).

[9] WANG S W,LI J C,LI X,et al. Dynamic photoelastic experimental study on the influence of joint surface geometrical property on wave propagation and stress disturbance[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2022,149:104985.

[10] XIAO P,LI D Y,ZHAO G Y,et al. Mechanical properties and failure behavior of rock with different flaw inclinations under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of Central South University,2020,27(10):2945-2958.

[11] 刘少虹,毛德兵,齐庆新,等. 动静加载下组合煤岩的应力波传播机制与能量耗散[J]. 煤炭学报,2014,39(增刊1):15-22.
LIU Shaohong,MAO Debing,QI Qingxin,et al. Under static loading stress wave propagation mechanism and energy dissipation in compound coal-rock[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(S1):15-22(in Chinese).

[12] SU Q Q,MA Q Y,MA D D,et al. Dynamic mechanical characteristic and fracture evolution mechanism of deep roadway sandstone containing weakly filled joints with various angles[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2021,137:104552.

[13] YU J,LIU Z H,HE Z,et al. Fluctuation characteristic test of oblique stress waves in infilled jointed rock and study of the analytic method[J]. Advances in civil engineering,2020,2020:7924742.

[14] 杨仁树,王茂源,杨阳,等. 充填材料对节理岩石动力学性能影响的模拟试验[J]. 振动与冲击,2016,35(12):125-131.
YANG Renshu,WANG Maoyuan,YANG Yang,et al. Simulation material experiment on the dynamic mechanical properties of jointed rock affected by joint-filling material[J]. Journal of vibration and shock,2016,35(12):125-131(in Chinese).

[15] 李夕兵,赖海辉,古德生. 爆炸应力波斜入射岩体软弱结构面的透反射关系和滑移准则[J]. 中国有色金属学报,1992,2(1):9-14.
LI Xibing,LAI Haihui,GU Desheng. Transfection relationship and slip criterion of soft structural surface of oblique incident rock mass of explosion stress wave[J]. The Chinese journal of nonferrous metals,1992,2(1):9-14(in Chinese).

[16] 陈超,杨志彬,马姣阳,等. 一维动静组合加载下多角度耦合充填体力学特性研究[J]. 金属矿山,2021,50(9):18-26.
CHEN Chao,YANG Zhibin,MA Jiaoyang,et al. Study on the mechanical properties of multi-angle coupled backfill under one-dimensional dynamic and static combined loading[J]. Metal mine,2021,50(9):18-26(in Chinese).

[17] 金解放,王杰,郭钟群,等.围压对红砂岩应力波传播特性的影响[J].煤炭学报,2019,44(2):435-444.
JIN Jiefang,WANG Jie,GUO Zhongqun,et al. Influence of confining pressure on stress wave propagation characteristics in red sandstone[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(2):435-444(in Chinese).
[18] 柴少波,王昊,井彦林,等.充填节理岩石累积损伤动力压缩特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(10):2025-2037.
CHAI Shaobo,WANG Hao,JING Yanlin,et al. Experimental study on dynamic compression characteristics of rock with filled joints after cumulative damage[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2020,39(10):2025-2037(in Chinese).
[19] BREKHOVSKIKHL M. 分层介质中的波[M].杨训仁,译.北京:科学出版社,1985.
[20] 李夕兵.岩石动力学基础与应用[M].北京:科学出版社,2014:322-324.

(编辑 张璐)

